

# Estudio de un detector de neutrones de centelleo de $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ como alternativa a los detectores de $^3\text{He}$ : Modelo MCNPX y validación

Karen A. Guzmán-García<sup>1</sup>, Héctor R. Vega-Carrillo<sup>2</sup>, Eduardo Gallego-Díaz<sup>1</sup>  
Alfredo Lorente-Fillol<sup>1</sup>, Roberto Méndez-Villafañe<sup>3</sup>, Juan A. González<sup>4</sup>  
Sviatoslav Ibañez-Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Energética, E.T.S. Ing. Industriales  
Universidad Politécnica de Madrid  
C. José Gutiérrez Abascal 2, 28006, Madrid España.  
Buzón-e: [karen.guzman.garcia@alumnos.upm.es](mailto:karen.guzman.garcia@alumnos.upm.es)

<sup>2</sup>Unidad Académica de Estudios Nucleares  
Universidad Autónoma de Zacatecas  
C. Ciprés 10, 98068, Zacatecas, México.

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT  
Avenida Complutense, 40, 28040, Madrid, España.

<sup>4</sup> Laboratorio de Ingeniería Nuclear, ETSI Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Madrid  
Campus Ciudad Universitaria, C. Profesor Aranguren 3, 28040, Madrid España.

## Resumen

Mediante métodos Monte Carlo con el código MCNPX, se ha estimado la respuesta de un detector de neutrones de centelleo de  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  con una mezcla de  $^{10}\text{B}$  de alto enriquecimiento. El detector consiste en cuatro placas de polimetil metacrilato (PMMA) y cinco capas de  $\sim 0,017$  cm  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  en contacto con el PMMA. Se calculó la respuesta del detector desnudo y con distintos espesores de moderador de polietileno de alta densidad, PEAD, para 29 fuentes monoenergéticas y para las fuentes de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$  de neutrones. En dichos cálculos se estimaron las reacciones  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  y la fluencia de neutrones en la zona sensible del detector,  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Se realizaron medidas en el laboratorio de medias neutrónicas, LMN-UPM, para cuantificar las detecciones en cuentas por segundo ante una fuente de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$  a 200cm sobre la bancada, modelando con MCNPX, dichas medidas se compararon validando el modelo y se estimó la eficiencia del  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  de detección  $\alpha$ . Se realizaron cálculos en el LPN-CIEMAT. A partir de la validación se realizaron nuevos modelos con geometrías que mejoran la respuesta del detector tratando de alcanzar la detección de 2,5 cps-ng de  $^{252}\text{Cf}$  requisito para ser equiparable en respuesta a los equipos instalados de  $^3\text{He}$  en los Monitores de Radiación tipo Pórtico, “*Radiation Portal Monitor, RPM's*”. Este tipo de detector se puede considerar alternativa a los detectores de  $^3\text{He}$  para la detección de “*Special Nuclear Material, SNM*”, Material Nuclear Especial.

**Palabras Claves:** MCNPX, detección, Material Nuclear Especial, neutrones.

# 1.- INTRODUCCIÓN

Los monitores de radiación tipo p $\acute{o}$ rtico (RPM's) instalados en aduanas y puntos cr $\acute{u}$ ticos de distintas partes de mundo, son sistemas de detecci $\acute{o}$ n pasivos que incluyen detectores gamma y detectores de neutrones, los detectores de neutrones com $\acute{u}$ nmente instalados son contadores proporcionales gaseosos de  $^3\text{He}$ , debido a que tienen una alta eficiencia de detecci $\acute{o}$ n, bajo fondo y una excelente discriminaci $\acute{o}$ n gamma [Kouzes *et al.*, 2010]. La principal raz $\acute{o}$ n de incluir detectores de neutrones es para la detecci $\acute{o}$ n de los llamados Special Nuclear Materias, SNM, materiales nucleares especiales como el plutonio  $^{239}\text{Pu}$ , que se pueden usar para la construcci $\acute{o}$ n de dispositivos de destrucci $\acute{o}$ n masiva [Kouzes, *et al.*, 2008].

Debido al incremento del control de mercanc $\acute{a}$ s para prevenci $\acute{o}$ n del tr $\acute{a}$ fico il $\acute{i}$ cito de material radiactivo y nuclear, el aumento en la instalaci $\acute{o}$ n de estos RPM's capaces de efectuar controles de forma fiable y r $\acute{a}$ pida se ha dado notablemente en numerosos pa $\acute{i}$ ses [Shea and Morgan, 2009]. En 2009 se report $\acute{o}$  un escasez de  $^3\text{He}$ , por lo que desde entonces se realizan distintas investigaciones en la b $\acute{u}$ squeda de alternativas tecnol $\acute{o}$ gicas de detecci $\acute{o}$ n que resulten atractivas y similares en caracter $\acute{i}$ sticas a los equipos instalados de  $^3\text{He}$  [Cooper *et al.*, 2009; Zeitelhack 2009].

## 1.1.- Bases Te $\acute{o}$ ricas

Los isotopos de  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$  y  $^{10}\text{B}$  son los m $\acute{a}$ s utilizados para la detecci $\acute{o}$ n de neutrones, ya que presentan una buena secci $\acute{o}$ n eficaz en su reacci $\acute{o}$ n con los neutrones que producen part $\acute{i}$ culas cargadas secundarias que permiten una buena detecci $\acute{o}$ n. El  $^{10}\text{B}$  y  $^6\text{Li}$  tienen respectivamente un 70% y 17% de la sesi $\acute{o}$ n eficaz que el  $^3\text{He}$ , y la probabilidad con los neutrones t $\acute{e}$ rnicos con estos elementos es proporcional a la secci $\acute{o}$ n eficaz [Balem 2010], Figura 1, Ecuaci $\acute{o}$ n 1.

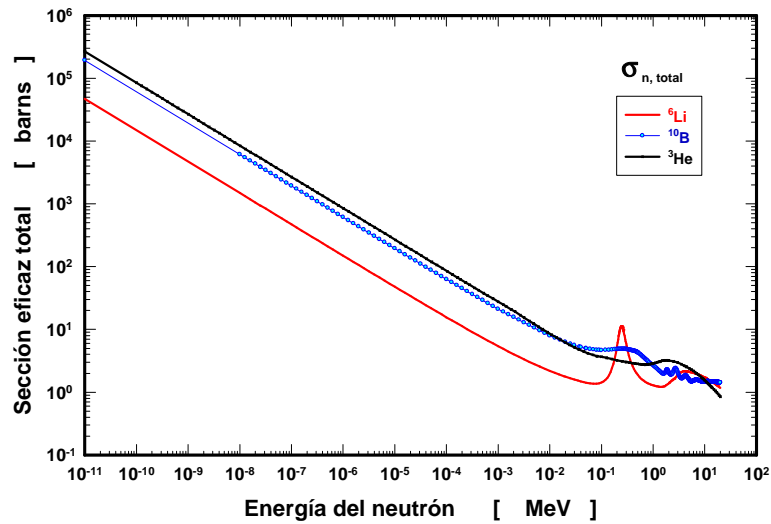
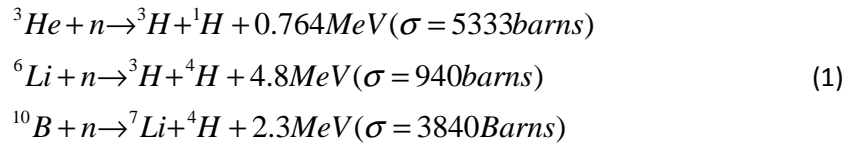


Figura 1.- Sección eficaz  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^6\text{Li}$ .

A pesar de la sección eficaz del  ${}^6\text{Li}$ , no es una buena opción debido a que en la naturaleza su abundancia es 7.5% y para contar con una buena cantidad de este isótopo hay que usar procesos de enriquecimiento que lo encarecen. Por otro lado, la abundancia del  ${}^{10}\text{B}$  es 19.8% por lo que su enriquecimiento es menos costoso [McMillan and Marsden, 2010].

Uno de los centelleadores inorgánicos más utilizados para la detección de partículas  $\alpha$  es el  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  que se caracteriza por tener una alta eficiencia, su inconveniente es que absorbe su propia luminiscencia por ello no puede ser utilizado en capas mayores a 25  $\text{mg}/\text{cm}^2$  [Lee et al., 2011]. En adición a  ${}^{10}\text{B}$  o  ${}^6\text{Li}$  también puede ser utilizado para la detección de neutrones ligados a algún material ópticamentetransparente como el Poli metil Metacrilato (PMMA). [Koontx et al., 1954] reportaron que el  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  con  ${}^{10}\text{B}$  da una alta eficiencia con respecto a otros compuestos de detección de neutrones.

A través de los Laboratorios de Ingeniería Nuclear (LIN), de la ETSI Caminos, Canales y Puertos, y de Medidas Neutrónicas (LMN), de la ETSI Industriales, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), han adquirido dos detectores fabricados por BridgePort comercialmente denominado como “nDet-Brick” (N-15A y N-15B) con moderadores diseñados y construidos por el LIN. Estos detectores se basa en utilizar capas muy finas de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ .

El objetivo de este trabajo fue determinar la respuesta a los neutrones del detector nDetBrick de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  en diferentes condiciones. La respuesta se determinó mediante métodos Monte Carlo, con el código MCNPX 2.6.0 [Pelowitz 2005]. Se validó el modelo con medidas realizadas en el Laboratorio de Medidas Neutrónicas del Departamento de Ingeniería Energética, LMN-DIE de la UPM con fuentes de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$ .

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1.-Descripción del detector nDetBrick (N-15)

El detector N-15 es un sistema de detección de neutrones de centelleo fabricado por la empresa BridgePort [BridgePort 2013]. Cuenta con un fotomultiplicador y su electrónica digital integrada con adquisición de datos vía USB, eMorpho MCA. El detector es de geometría rectangular con dimensiones exteriores de  $23 \times 36 \times 4$  cm como se observa en la Figura 2.

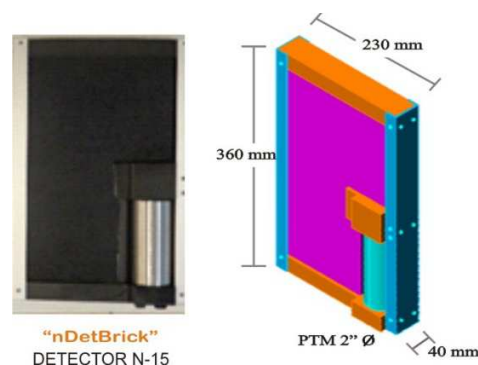


Figura 2.- Detector “nDetBrick” desnudo.

La zona sensible del detector está formada por 5 placas transparentes de  $\sim 0.017$  cm de espesor formadas por una mezcla de  $^{10}\text{B}$ , enriquecido al 95% y del centellador de  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ ,  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Las placas o láminas están depositadas entre 4 placas de PMMA de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de espesor que actúan como guía de luz y moderador, rodeado de un reflector de  $\sim 8\mu\text{m}$  de espesor de aluminio mylar, como se muestra en la Figura 3.

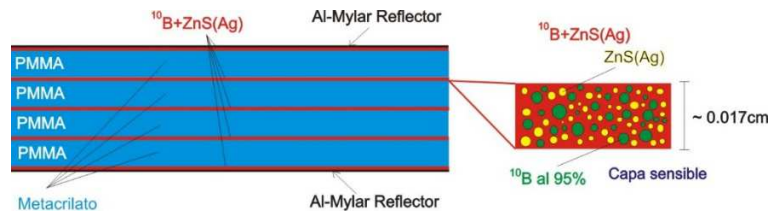


Figure 3.- Corte interior del detector nDetBrick.

El LIN ha diseñado dos moderadores de Polietileno de Alta Densidad, PEAD, de 12 mm de espesor de moderador frontal, inferior y superior y 24mm de espesor de moderador laterales y posterior, (12+24) mm y otro de 24 mm de espesor de moderador frontal, inferior y superior y 48 mm de espesor de moderador laterales y posterior (24+48) mm, Figura 4.



Figura4.- Moderadores de Polietileno de Alta densidad, PEAD 12+24 y 24+48 mm.

## 2.2.- Descripción del Modelo MCNPX

En el modelo Monte Carlo se incluyen todos los detalles del detector, definiendo claramente la geometría y los materiales en fracción peso de todos los elementos del material en cada celda. Se definieron las cuatro placas de PMMA de 0,635 cm con una densidad de 1,15 g/cm<sup>3</sup>, el PTM de cristal al vacío, los soportes de aluminio y las cinco capas sensibles del detector <sup>10</sup>B+ZnS(Ag) tomando cada elemento en una celda aparte, <sup>10</sup>B enriquecido al 95% (0,95 de <sup>10</sup>B y 0,05 de <sup>11</sup>B) y el ZnS (0,5 de Zn y 0,5 de S). En la Figura 5 se muestra gráficamente la selección de celdas y el detector definido en el MCNPX.

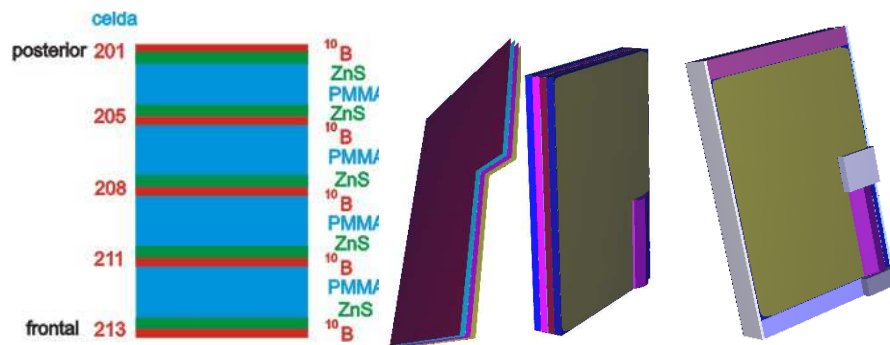


Figura5.- Modelo de detector N-15 MCNPX.

Se calculó la respuesta del detector para 29 fuentes monoenergéticas de neutrones de energías de 10<sup>-9</sup> a 20MeV, en distintas condiciones; desnudo y variando espesores de moderadores de PEAD de 10-100mm, incluyendo los moderadores contruidos de 12+24 y 24+48 mm PEAD. También se calcularon las respuestas para las fuentes de neutrones de <sup>241</sup>AmBe y <sup>252</sup>Cf, en total se realizaron 403 casos para determinar la respuesta del detector bajo estas condiciones.

La cantidad de reacciones de <sup>10</sup>B(n,α)<sup>7</sup>Li en el <sup>10</sup>B se calcularon mediante el producto de la fluencia de neutrones en cada celda con el contabilizador “tally” F4 y la sección eficaz de la reacción (107) (n, α) [Vega,-Carrilloet al., 2014a; Vega,-Carrilloet al., 2014b]. La fluencia se determinó en cada celda sensible del detector (201, 205, 208, 211, 214) mediante el “tally”F4. Figura 6.

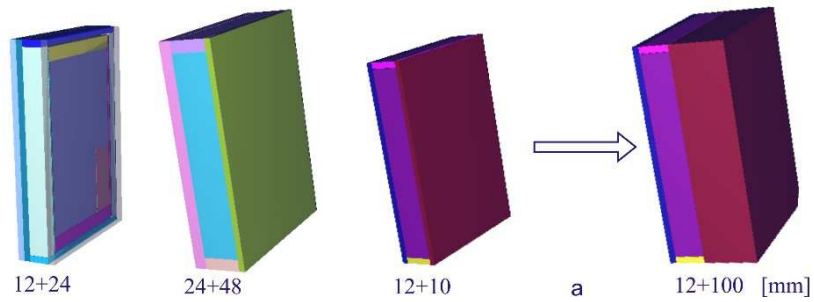


Figura6.- 12 Moderadores de PEAD; (12+24), (24+48) y 0-100 [mm] de PEAD.

Se acoplo el modelo del detector con el modelo de LPN [Rubio Oviedo 2009] posicionando el detector a distintas puntos 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 cm de las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$ , para determinar el número de reacciones y compararlas con medidas hechas en el laboratorio, de esta modo validar el modelo y determinar la eficiencia del ZnS(Ag). Figura 7.

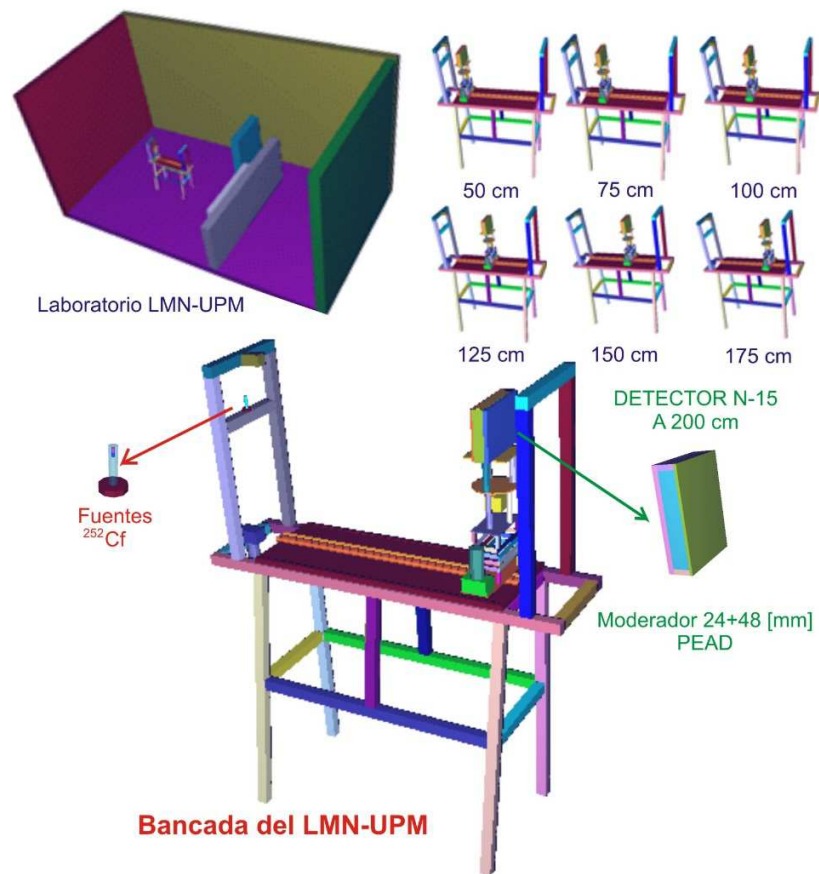


Figura 7.- Modelo del detector en bancada LMN en las siete posiciones.

Se acoplo el modelo del detector con el de Laboratorio de Patrones Neutrónicos CIEMAT [Guzmán-García *et al.*, 2015] posicionando el detector a 200 cm de la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$  y se determinó el número de reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ , Figura 8.

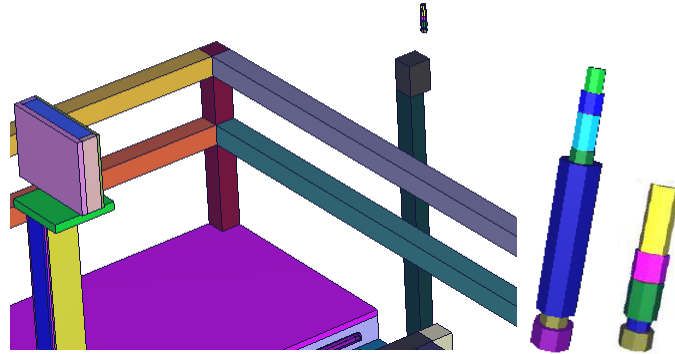


Figura 8.- Modelo del detector en bancada LPN-CIEMAT.  
Fuentes de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{AmBe}$ .

La cantidad de historias fue suficiente para obtener un error estadístico menor al 3%; se utilizaron las secciones eficaces de la librería ENDF/B-VI. En los cálculos se incluyó el tratamiento  $S(\alpha, \beta)$  para incluir el efecto del moderador para neutrones de bajas energías [Vega-Carrillo *et al.*, 2014b]. Debido a las restricciones del espacio en este trabajo se muestran los resultados más representativos.

### 2.3.- Experimento en el Laboratorio LMN

Las medidas se realizaron en el Laboratorio de Medidas Neutrónicas del actual Departamento de Ingeniería Energética, ETSI Industriales, UPM, con dos fuentes de  $^{252}\text{Cf}$   $10\mu\text{Ci}$  las cuales se posicionan de manera manual en la bancada. Tienen dimensiones de 7,8 de  $\varnothing$  por 10 mm de longitud dentro de un doble encapsulado de acero, depositadas ambas dentro de un soporte de polietileno para su manipulación y un contenedor cilíndrico para su almacenamiento, como se observa en la Figura 9.



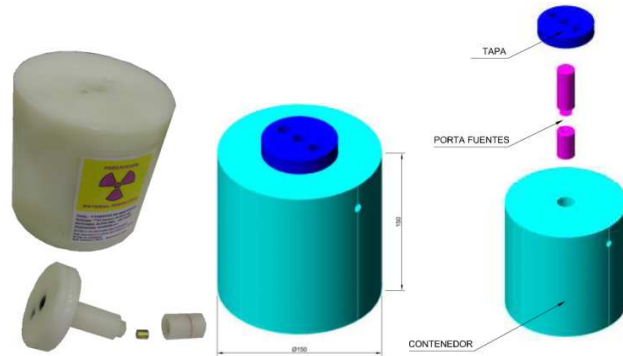


Figura 9.- Fuentes de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$  en soporte y contenedor de PEAD.

Los ensayos se hicieron el día 10 y 21 de Marzo de 2015 ( $Q = 53106,19 \text{ n/s}$ ), corregido por decaimiento mediante la Ecuación 2. Se hicieron siete medidas con las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  dentro del soporte de PEAD, posicionadas en la bancada como lo muestra la figura 10, 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 cm, para cada posición se midió el fondo de neutrones.

$$N(t) = N(o)e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (2)$$

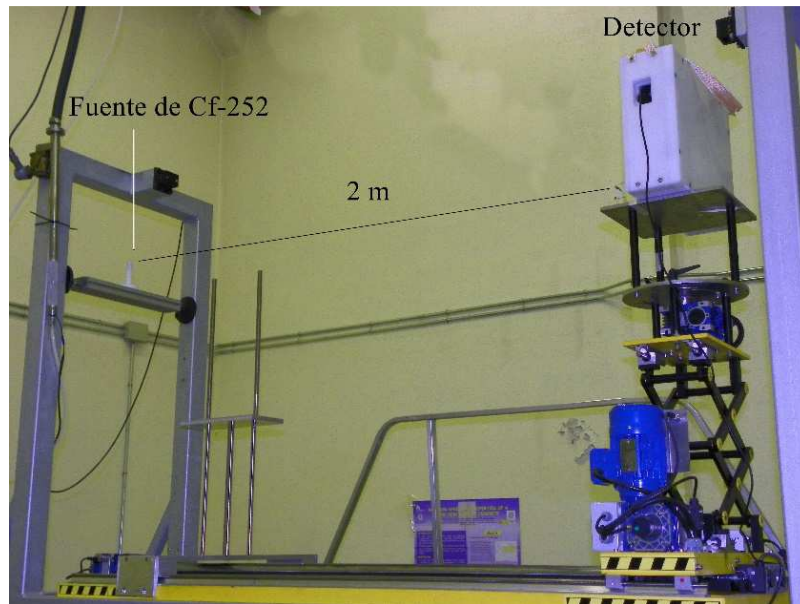


Figura 10.- Medidas con las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$ , N-15B a 200 cm.

### 3.- RESULTADOS

#### 3.1.- Respuesta del detector MCNPX

En la Figura 11, se muestra la función respuesta  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  del detector en condición desnudo y con dos moderadores de PEAD de 12+24 y 24+48 mm, ante las 29 fuentes monoenergéticas de neutrones de  $10^{-9}$  a 20 MeV. La importancia de esta gráfica es que representa la respuesta de los moderadores diseñados y construidos por el LIN.

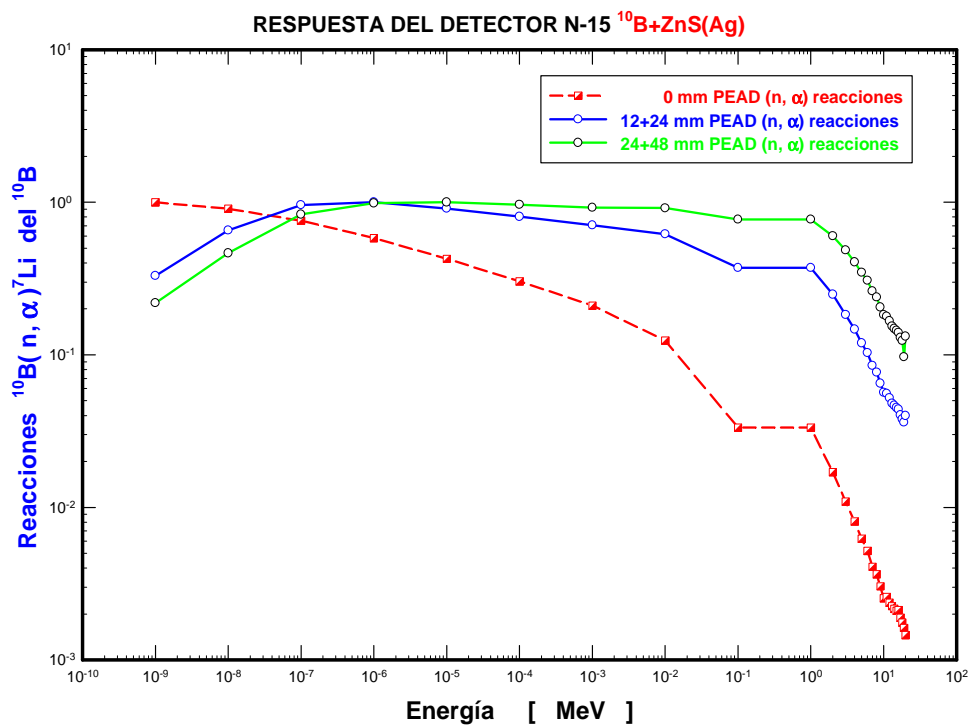


Figura 11.- Respuesta  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  en función de la energía del neutrón (normalizada)

En la Figura 12, se muestra la respuesta a la fluencia de neutrones en las zonas sensibles del detector en condición desnudo y con dos moderadores de PEAD de 12+24 y 24+48 mm, construidos.

RESPUESTA DEL DETECTOR N-15 A LA FLUENCIA DE NEUTRONES  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$

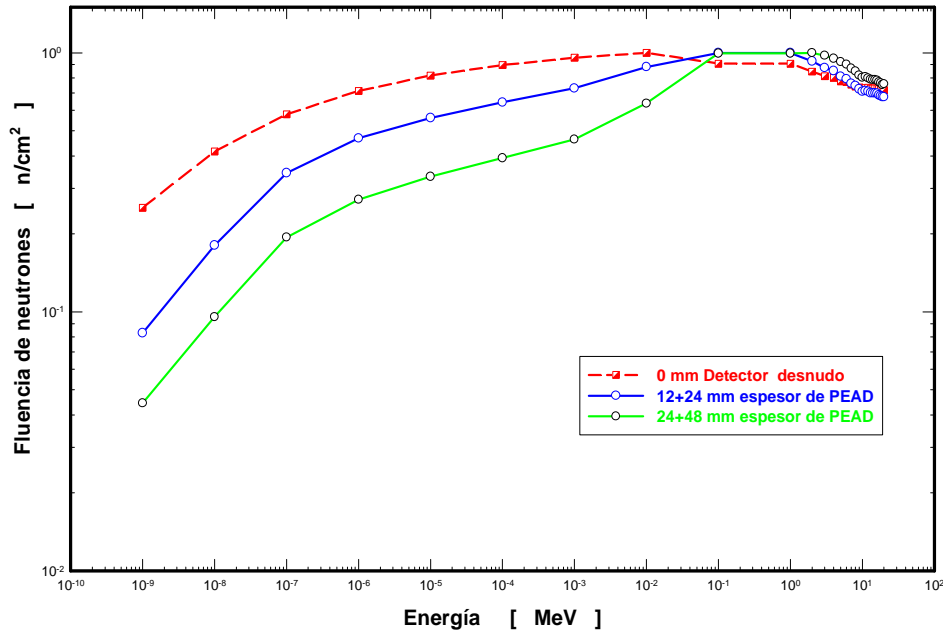


Figura 12.- Respuesta a la fluencia de neutrones en función de la energía del neutrón incidente por cada neutrón emitida por la fuente usando 0, 12+24 y 24+48 mm de PEAD.

En la Figura 13, se muestra la respuesta del detector para 10 distintos espesores de PEAD, (Figura 6), la gráfica muestra la respuesta a las reacciones de  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  ocurrientes en el  $^{10}\text{B}$  de todo el detector,  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ .

En la Figura 14, se muestra la respuesta a la fluencia en las zonas sensibles del detector con 10 moderadores de PEAD.

En la Figura 15, se muestra la respuesta al número de reacciones  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  del detector ante una fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$  con 10 distintos espesores de PEAD.

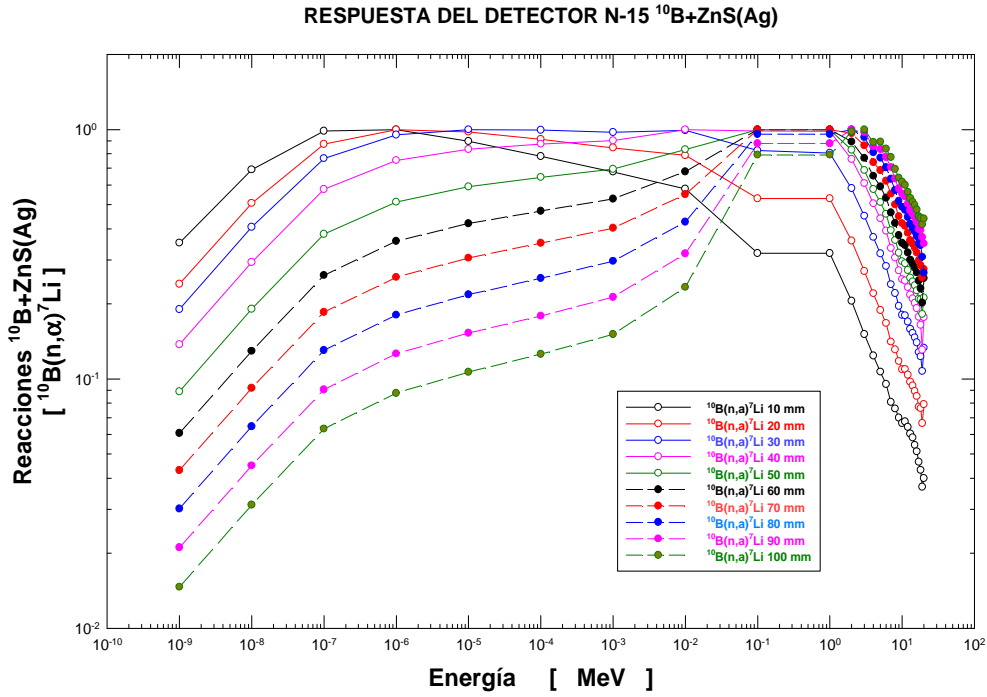


Figura 13.- Respuesta  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  en función de la energía del neutrón incidente por cada neutrón emitido por la fuente usando espesores de PEAD de 12 + 10 hasta 100 mm.

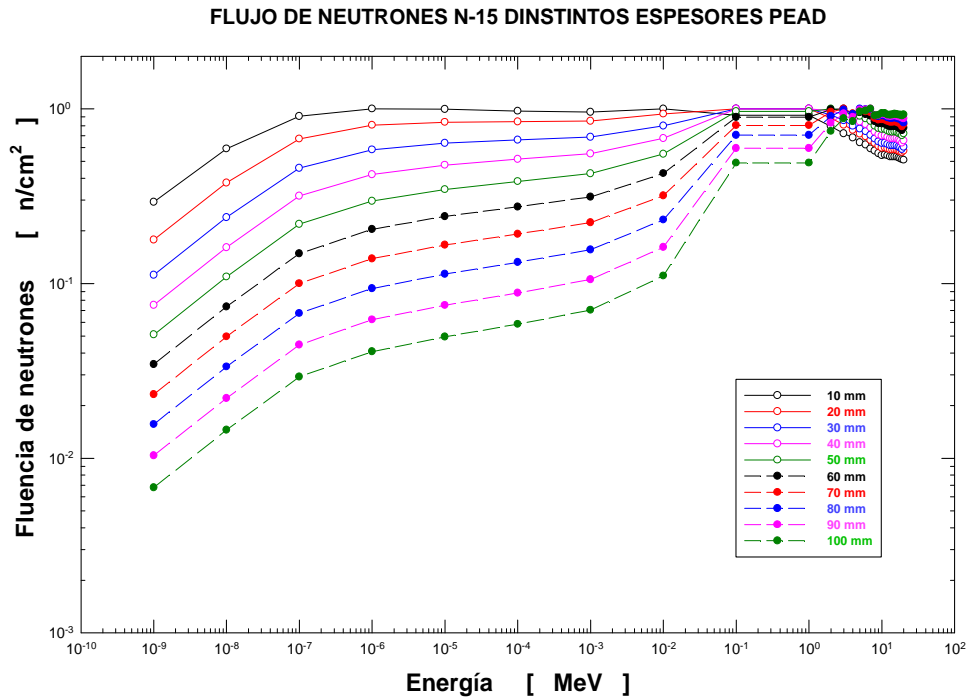


Figura 14.- Respuesta a la fluencia función de la energía del neutrón (normalizada), 12 + (10-100) mm de PEAD.

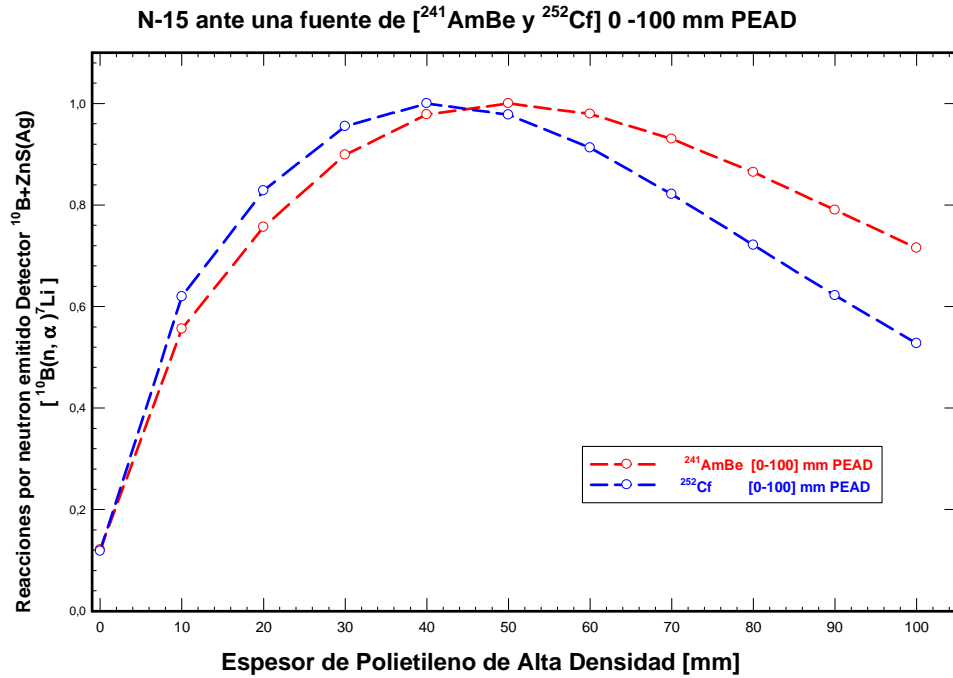


Figura 15.- Respuesta al número de reacciones de <sup>241</sup>AmBe y <sup>252</sup>Cf, con moderadores de 12 + (10-100) mm de PEAD en función de la energía del neutrón (normalizada)

### 3.2.- Modelo MCNPX y medidas LMN-UPM Validación modelo.

En la Tabla 1, se muestran las cuentas por segundo (cps) en las medidas sobre la bancada a distintas distancias de las fuentes de <sup>252</sup>Cf, las medidas realizadas después se han corregido como se muestra en la tabla.

En la Tabla 2, se observa las reacciones ocurrentes en el <sup>10</sup>B(n, $\alpha$ )<sup>7</sup>Li en el detector dadas por el MCNPX, dicho resultado se da por neutrón emitido en la fuente por lo que semultiplica por la intensidad de la fuente de <sup>252</sup>Cf al día de las medidas 53.106,18854 n/s, en la última columna se muestra el porcentaje % de diferencia que existe entre las medidas y el modelo que van de valores desde 48,43 a 55,52 %, tomando en cuenta que el detector está ajustado y calibrado para discriminación gamma, sabiendo que no todas las reacciones que se producen en el <sup>10</sup>B+ZnS(Ag) llegan a ser contabilizadas por el PTM, se estima un factor de eficiencia de (53,03  $\pm$  0,4) % , 0.5303  $\pm$  0,004.

Tabla 1.- Medidas en LMN-UPM nDetBrick N15A

Distancia [cm]	Fecha dd/mm/aaaa	cpm Fondo [F]	cpm <sup>252</sup> Cf	cpm <sup>252</sup> Cf-F	cps <b>corregida</b>
50	10/03/2015	163,9583	12685,20	12521,24	208,69± 14,45
75	<b>24/03/2015</b>	166,5	6157,75	5991,25	<b>100,86 ± 10,04</b>
100	10/03/2015	164,4	3663,17	3468,77	57,81 ± 7,61
125	<b>24/03/2015</b>	168,67	2495,33	2326,67	<b>39,17± 6,25</b>
150	<b>24/03/2015</b>	174,5	1828,33	1653,83	<b>27,84± 5,28</b>
175	10/03/2015	165,4	1479,33	1313,93	21,90 ± 4,67
200	10/03/2015	163,8	1209,60	1045,80	17,43 ± 4,18

Tabla 2.- Medidas y MCNPX

Distancia [cm]	MCNPX [R] <sup>10</sup> B(n, α) <sup>7</sup> Li	[R · <sup>252</sup> Cf] [n/s]	eMorpho [cps]	% eMorpho/MCNP
50	8,11692E-03	431,058	208,69	48,42
75	3,65801E-03	194,263	100,86	51,92
100	2,09000E-03	110,992	57,813	52,09
125	1,36565E-03	72,524	39,169	54,01
150	9,74598E-04	51,757	27,842	53,80
175	7,42756E-04	39,445	21,899	55,52
200	5,91489E-04	31,412	17,430	55,49

\*<sup>252</sup>Cf, 10/03/2015 [53.106,18854 n/s]

En la Tabla 3, se muestran las cuentas por segundo (cps) medidas sobre la bancada y la respuesta del detector con el modelo MCNPX ajustado por el factor determinado como eficiencia de ZnS(Ag) de  $0.5303 \pm 0,004$ . En la Figura 16 se observa la gráfica de correlación de ambos resultados.

Tabla 3.- Medidas y MCNPX corregidas por factor eficiencia ZnS(Ag)

Distancia [cm]	eMorpho [cps]	MCNPX [cps]
50	208,69 ± 14,45	228,6 ± 3,20
75	100,87 ± 10,04	103,02 ± 2,14
100	57,82 ± 7,61	58,92 ± 1,61
125	39,17 ± 6,25	38,46 ± 1,30
150	27,84 ± 5,28	27,45 ± 1,10
175	21,90 ± 4,67	20,91 ± 0,96
200	17,43 ± 4,18	16,66 ± 1,07

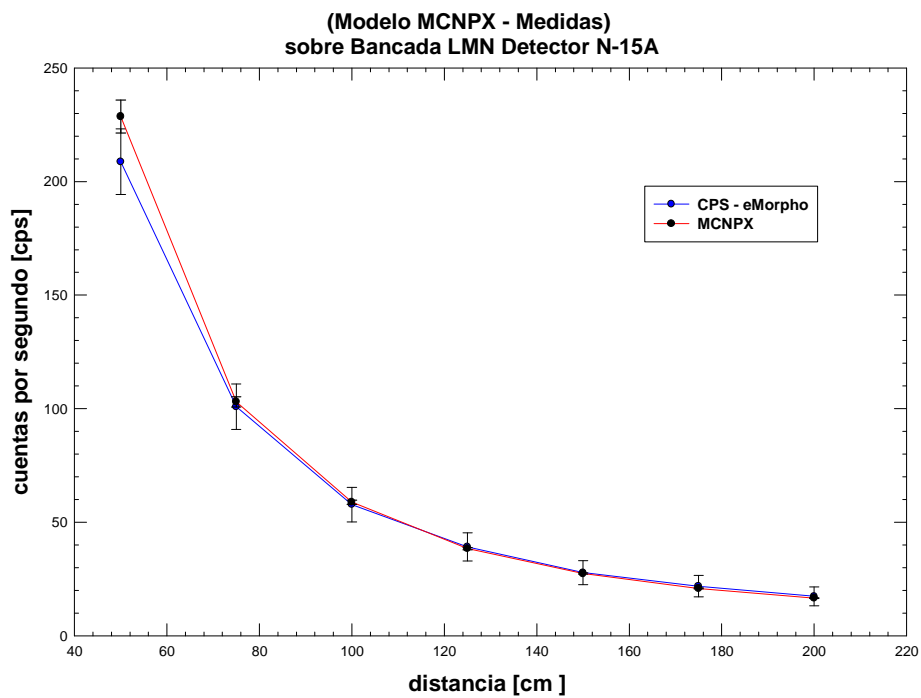


Figura 16.- Rapidez de conteo, medida y calculada, del detector sobre la bancada.

Debido a que la intensidad de la fuente al día de las medidas de  $5.3E(4) \text{ s}^{-1}$  que corresponde a una masa de  $2,26E(-9) \text{ g}$  de  $^{252}\text{Cf}$  [Vega-Carrillo 1988]; a 200 cm de distancia la rapidez de conteo del detector es 17,43 cps por lo que la relación entre los nano gramos de

californio y las cuenta por segundo detectadas a 200 cm, se calcula que el detector tiene la capacidad de detectar 0,77 cps por cada ng de  $^{252}\text{Cf}$ .

### 3.2.1- Modelo MCNPX LPN CIEMAT

En la Figura 17 se muestra el modelo MCNPX con las fuentes a 400 cm del suelo y 200 cm del detector N-15. En la Tabla 4, se muestra la respuesta al número de reacciones por neutrones emitido del modelo ante las fuentes de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$  del CIEMAT, correspondientes a la fecha que se hagan las medidas correspondientes se tomara en cuenta el flujo de neutrones de las fuentes a la fecha y determinarán las cps que el detector dará utilizando el factor de eficiencia del ZnS(Ag) determinado con las medidas y cálculos del LMN.

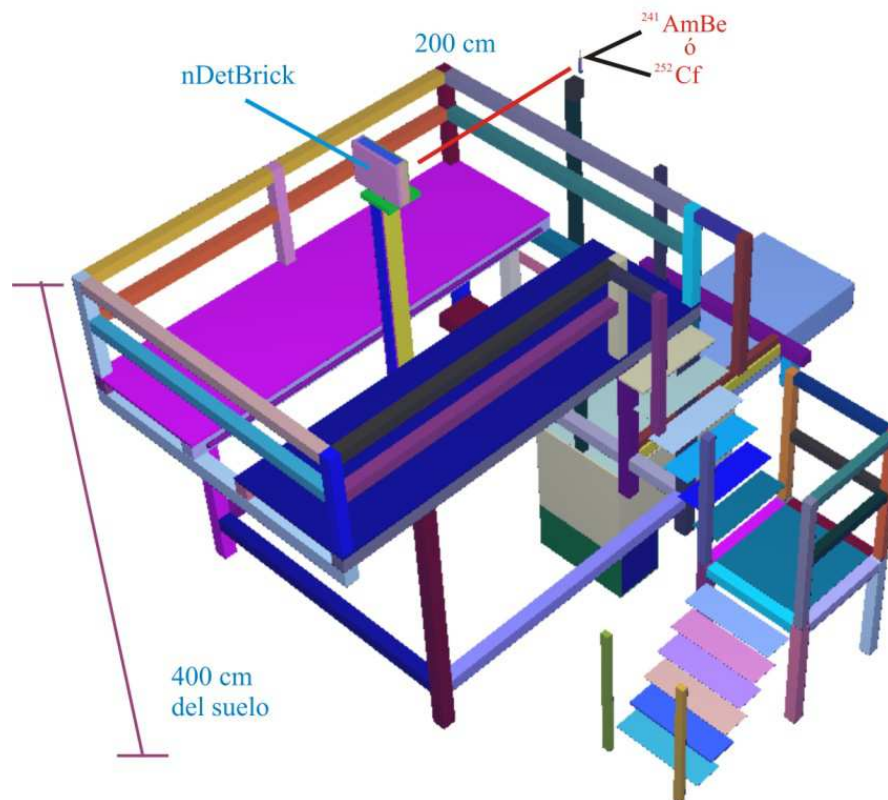


Figura 17.- Modelo del detector N-15 en la bancada del LPN-CIEMAT a 200cm.



Tabla 4.- reacciones MCNPX LMN-UPM y LPN-CIEMAT

Distancia [cm]	MCNPX LMN-UPM	MCNPX LPN-CIEMAT
$^{252}\text{Cf}$	$(59,149 \pm 2,024)\text{E-05}$	$(59,958 \pm 3,34)\text{E-05}$
$^{241}\text{AmBe}$	-	$(47,409 \pm 2,95)\text{E-05}$

## 4.- DISCUSIÓN

En la Figura 11, se ve claramente el efecto de moderación, el espesor de PEAD mayor 24+48 mm arroja una curva más lineal en la zona de  $10^{-7}$  a 1 MeV, lo que indica que de los dos moderadores construidos este moderador es mejor con respecto al moderador de 12+24 mm, ya que tiene un rango más amplio de energías de neutrones donde da un mayor número de reacciones.

En la Figura 12, la curva que corresponde al detector desnudo nota una cantidad mayor de flujo en los neutrones de bajas energías y disminuye conforme el detector es moderado, obteniendo una mayor cantidad de neutrones para las zonas de neutrones de mayores energías, que van desde  $10^{-2}$  MeV. Este comportamiento en las curvas de la gráfica hace notar la capacidad de moderación de PEAD.

En la Figura 13, los resultados muestran constancia en el intervalo de  $10^{-7}$  a 1 MeV en los espesores de entre 30 y 40 mm de PEAD dando una respuesta más lineal para el mayor rango de energías de neutrones. Se nota que conforme el espesor aumenta la respuesta para los neutrones de bajas energías disminuye pero aumenta para energías más grandes. Este comportamiento es similar al reportado en el sistema espectrométrico de esferas Bonner debido a la moderación de los neutrones en el moderador [ Mazrou *et al.*, 2010].

En la Figura 14, el moderador de 10 mm parece tener una fluencia prácticamente lineal para todas las energías, se nota más a partir de neutrones de  $10^{-7}$  MeV.

En la Figura 15, notamos que para la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  el mayor número de reacciones se presenta con un moderador de 50 mm y para el  $^{252}\text{Cf}$  de 40 mm de PEAD. Esto se debe a que la energía promedio de cada fuente es distinta, siendo 5 MeV para el  $^{241}\text{AmBe}$  y 2 MeV para el  $^{252}\text{Cf}$  [Vega-Carrillo *et al.*, 2005], por lo que los neutrones del  $^{241}\text{AmBe}$  requieren de un mayor espesor de PEAD para ser termalizados, también se puede observar dicho comportamiento en la Figura 13.

En la Tabla 1, se muestran las cuentas por segundo (cps) en las medidas sobre la bancada a 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 cm de las fuentes en el soporte de PEAD, algunas medidas se realizaron en días posteriores y el tiempo de decaimiento se tomó en cuenta para comparar medidas, los errores estadísticos se determinaron. En Tabla 2 se observan las reacciones ocurrentes en el  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  en el detector dados por el modelo MCNPX, por la intensidad de las fuentes determinando un factor de eficiencia de detección, tomando en cuenta que los centelleos que se producen durante las reacciones en el  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  llegan al fotomultiplicador, el valor fue de  $(53,03 \pm 0,4) \%$ ,  $0.5303 \pm 0,004$ .

En la Tabla 3, se muestran la rapidez de conteo en cps medidas sobre la bancada y la respuesta del detector con el modelo MCNPX ajustado por el factor determinado como eficiencia de  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  de  $0.5303 \pm 0,004$ , la tabla y la Figura 16 muestran una correlación admisible en la comparación, dentro de los límites de error.

## 5.- CONCLUSIONES

Mediante métodos Monte Carlo se ha calculado la respuesta a las reacciones en el  $^{10}\text{B}$  del detector y a la fluencia de neutrones, ante 29 fuentes mono energéticas de neutrones, para el detector desnudo y con los moderadores diseñados y construidos por el LIN 12+24 y 24+48 mm PEAD siendo el 24+48 la condición con una respuesta más lineal en el mayor rango de energías de neutrones, y un mayor número de reacciones ocurrentes en las zonas sensibles del detector con respecto a las otras dos condiciones.

Se extendió el cálculo para realizarlo con distintos moderadores de PEAD de 12 mm en los laterales y la cara frontal variando de 10 a 100 mm, concluyendo que los espesores de 30 y 40mm PEAD responden de una manera más lineal para un rango extenso de energías de neutrones, lo que indica que es el espesor óptimo de fabricación para adquirir un mayor número de reacciones en esa zona de energías.

Se ha estimado la respuesta del detector ante dos fuentes de neutrones de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$  desnudo y antes distintos espesores de PEAD, de tal modo conociendo el espesor óptimo para adquirir el mayor número de reacciones.

- Para las fuentes monoenergéticas el número de reacciones varía con la energía del neutrón y el espesor del PEAD.
- La mayor cantidad de reacciones para neutrones de energía menor a 10-7 MeV ocurren con el detector desnudo, para este mismo caso la menor cantidad de reacciones ocurre para neutrones de energía mayor a  $2 \times 10^{-2}$  MeV. Conforme el espesor del PEAD aumenta la respuesta a los neutrones de baja energía disminuye y aumenta para neutrones de mayor energía.

Se realizaron medidas en el laboratorio de Medidas Neutrónicas de la UPM y mediante cálculos MCNPX se construyó un modelo detallado para estimar la respuesta del detector en las mismas condiciones, con ello se determinó un factor de eficiencia de detección. Con este factor se realizaron medidas en el LPN CIEMAT, y con otros detectores para relacionar el coeficiente.

Los detectores de neutrones de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  son una alternativa interesante en reemplazo a los detectores instalados de  $^3\text{He}$  en los RPM's. Una mejora en la geometría aumentaría la capacidad de detección intentando cumplir la norma de 2,5 cps/ng de  $^{252}\text{Cf}$  para ser considerados como alternativa [Woodring *et al.*, 2010].

## Agradecimientos

La primera autora K.A Guzmán-García, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, (CONACyT) y al Consejo Zacatecano de Ciencia Tecnología e Innovación, (COZCyT), por la beca para realizar estudios de posgrado en Madrid, España.

## REFERENCIAS

- Balem C. (2010). *Technical Testing of the STRIDE Stanchion Detector System*. Master of Science Dissertation. University of Surrey, UK.
- BridgePort Instruments, LLC, (2013). *Neutron Detector System R2D-nDet, Device-Specific data Sheet*. R2D-nDet-15 ds 1095, 03.
- Cooper R; Greenfield D; Rhodes N; Engers R; Zetelhack K; Guerard B; Kemmerling G; Kiselev O; Smith G; Soyama K; Wilpert T; Klein M; Defendi LI. (2009). *The <sup>3</sup>Helium supply crisis and alternative techniques to <sup>3</sup>Helium based neutron detectors for neutron scattering applications*. Report on the Meeting of Detector Experts. FRM II, Grenoble, France. Pp. 1-20.
- Guzmán-García KA; Mendez-Villafañe R; Vega-Carrillo HR. (2015). *Neutron field characteristics of CIEMAT's Neutron Standards Laboratory*. Applied Radiation and Isotopes **100**: 84-90.
- Kouzes RT; Siciliano ER; Ely JH; Keller PE; McConn RJ. (2008). *Passive neutron detection for interdiction of nuclear material at borders*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **584**: 383-400.
- Kouzes RT; Ely JH; Lintereur AT; Siciliano ER; Stromswold DC; Woodring ML. (2010). *Alternative neutron detection testing summary*. Report PNNL 19311. Pacific Northwest National Laboratory, USA. Pp. 1-47.
- Koonts PG; Keepin GR; Ashley JE. (1954). *ZnS(Ag) Phosphor mixtures for neutron scintillation counting*. Report LA-1663. Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, USA.
- Lee SK; Kang ShY; Jang DY; Lee ChH; Kang SM; Kang BH; Lee WG; Kim YK. (2011). *Comparison of new simple methods in fabricating ZnS(Ag) scintillators for detecting alpha particles*. Nuclear Science and Technology **1**: 197-198.

- Mazrou H; Idiri Z; Sidahmed T. (2010). *MCNP5 evaluation of a response matrix of a Bonner sphere spectrometer with a high efficiency  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  detector from 0.01 eV to 20 MeV neutrons*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **284**: 253-263.
- McMillan J; Marsden E. (2010). *Neutron detectors for security applications*. 19<sup>th</sup> International Workshop on Vertex Detectors-VERTEX 2010. Pp. 1-5.
- Pelowitz DB. (2005). *MCNPX User's Manual Version 2.5.0*. Report LA-Cp-05-0369. Los Alamos National Laboratory. USA.
- Rubio Oviedo IP. (2009). *Modelo del laboratorio de medidas neutrónicas por métodos Monte Carlo*. Proyecto de fin de grado. Universidad Politécnica de Madrid.
- Shea DA; Morgan D. (2010). *The Helium-3 shortage: Supply, demand and options for congress*. Congressional Research Service, CRS Report for the US Congress.
- Vega-Carrillo HR. (1988). *Medición del espectro de neutrones y rayos gamma de una fuente de Californio-252 en un medio de tejido equivalente*. Revista Mexicana de Física **34**:25-29.
- Vega-Carrillo HR; Manzanares E; Hernández-Dávila VM; Mercado GA; Gallego-Díaz E; Lorente-Fillol A. (2005). *Características dosimétricas de fuentes isotópicas de neutrones*. Revista Mexicana de Física **51**: 494-501.
- Vega-Carrillo HR; Barquero R; Mercado GA. (2014a). *Passive neutron area monitor with CR39*. International Journal of Radiation Research **11**: 149-153.
- Vega-Carrillo HR; Guzmán-García KA; Gallego E; Lorente A. (2014b). *Passive neutron area monitor with pairs of TLDs as neutron detector*. Radiation Measurements **69**: 30-34.
- Woodring ML; Ely JH; Kouzes RT; Stromswold DC. (2010). *Boron-lined multitube neutron proportional counters test*. Report PNNL-19726. Pacific Northwest National Laboratory, USA.
- Zeitlhack K. (2009). *The  $^3\text{Helium}$  supply crisis and alternative techniques to  $^3\text{Helium}$  based neutron detectors for neutron scattering applications*. Report on the Meeting of Detector Experts. FRM II, Grenoble, France. Pp. 1-20.